

L'indagine delle proprietà meccaniche della sovrastruttura stradale tramite georadar

Andrea Benedetto*

Fabio Tosti**

Luca Bianchini Ciampoli***

- * Professore Associato del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi Roma Tre
- ** Ingegnere e Dottore di Ricerca del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi Roma Tre
- *** Ingegnere e studente di Dottorato del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi Roma Tre

Abstract

Le caratteristiche prestazionali di una pavimentazione stradale necessitano di un costante ed efficace monitoraggio sia sotto l'aspetto della minimizzazione dei costi di manutenzione quanto sotto il profilo della sicurezza di esercizio. Le tradizionali tecniche di controllo e verifica delle proprietà di resistenza meccanica dei vari strati di pavimentazione assicurano una elevata affidabilità della misura, ma al tempo stesso risultano poco significative a rappresentare le condizioni di salute complessive di infrastrutture estese come quelle stradali, oltre che particolarmente onerose sotto il profilo economico. In questo contesto, l'utilizzo di tecnologie non distruttive sta assumendo un ruolo sempre più importante e talvolta prevalente nello scenario di mercato delle prove di caratterizzazione delle pavimentazioni e dei materiali stradali. Il presente lavoro introduce un approccio di tipo semi-empirico per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche della sovrastruttura stradale di una pavimentazione flessibile calibrato su un campo prove alla meso-scala di investigazione e specificamente volto alla valutazione del modulo di elasticità delle sovrastrutture.

Introduzione

L'indagine preventiva delle caratteristiche prestazionali di una pavimentazione stradale risulta di prioritaria importanza nella corretta implementazione di un efficace Sistema di Manutenzione Programmata delle strade o Pavement Management System (PMS), in quanto la determinazione della soluzione manutentiva più idonea può consentire un notevole contenimento dei costi di intervento, specialmente ove questi siano legati ad operazioni di ripristino e riabilitazione delle condizioni strutturali di origine.

D'altra parte, un idoneo monitoraggio delle caratteristiche prestazionali di un'infrastruttura stradale incide anche sulla sicurezza di esercizio relativamente alla tempestività dell'intervento manutentivo da approntare che, se in difetto sui tempi, può avere ricadute non trascurabili sullo stato di ammaloramento del piano viabile, mostrando effetti sulle caratteristiche di regolarità e aderenza, fino all'incidentalità attesa nei tratti interessati. In riferimento a questo tema, molti studi di letteratura sono stati dedicati all'analisi delle cause principali degli incidenti stradali, dimostrando

come l'evento incidentale si caratterizza attraverso una complessa combinazione di avvenimenti, funzione di variabili di diversa natura quali, tra le altre, la geometria stradale, la componente umana e il comportamento degli utenti alla guida, le condizioni di deflusso e le misure di sicurezza stradale messe in atto, i limiti di velocità imposti e le caratteristiche prestazionali dei veicoli su strada. I risultati di diverse investigazioni e analisi statistiche condotte su incidenti stradali, hanno dimostrato tuttavia come sussista uno strettissimo legame tra le condizioni della pavimentazione stradale e l'occorrenza di eventi incidentali [1].

Va di fatto anche osservato come l'aumento dei volumi di traffico su gomma e il progressivo invecchiamento del patrimonio infrastrutturale di molti paesi, anche industrializzati, in cui la necessità di realizzare nuove infrastrutture è andata progressivamente esaurendosi, ha acuito l'esigenza di sviluppare tecniche di monitoraggio sia affidabili quanto efficienti per il controllo solerte delle condizioni della pavimentazione a livello di rete.

In questo lavoro si presenta un modello semi-empirico innovativo basato sull'utilizzo del georadar. Il modello è stato sviluppato alla meso-scala di investigazione su pavimentazione flessibile basandosi sulle caratteristiche di ampiezza del segnale elettromagnetico rilevato, in relazione al modulo elastico misurato in diversi punti della pavimentazione di prova, con lo scopo di garantire un monitoraggio preventivo e una diagnostica efficace per la stima delle proprietà meccaniche e la salvaguardia delle caratteristiche prestazionali della pavimentazione.

Stato dell'arte nella valutazione delle caratteristiche meccaniche delle pavimentazioni flessibili

Tecniche distruttive e a basso rendimento

La determinazione delle caratteristiche meccaniche della sovrastruttura e del corpo stradale avviene convenzionalmente attraverso l'ausilio di tecniche standard oramai consolidate nel campo dell'ingegneria stradale, caratterizzate da una elevata affidabilità della misura restituita, che al contempo risultano però avere una significatività modesta a causa della capacità di investigare solo localmente le proprietà meccaniche della pavimentazione e del corpo stradale. Si illustrano a seguire in breve le principali prove di tipo distruttivo e a basso rendimento per la caratterizzazione delle proprietà di resistenza delle pavimentazioni stradali, sviluppate sia in ambiente di laboratorio che in sito.

La prova CBR

La prova CBR misura la capacità portante di un terreno di sottofondo in determinate condizioni di densità e umidità, fornendo un indice di riferimento denominato indice di portanza CBR [2]. In Italia, l'esecuzione della prova CBR in laboratorio è definita dalla norma UNI EN 13286-47:2012 [3]. La misura dell'indice CBR può avvenire anche in sito, come descritto dalla prova ASTM D4429-09a [4]. Varie correlazioni sono state fornite in letteratura tra l'indice CBR e il modulo elastico statico di terreni di varia natura e granulometria. Recentemente, una relazione di tipo sperimentale capace di relazionare con buona approssimazione questi due indici per diversi tipi di terreno da sottofondo stradale è stata presentata dallo US Department of the Air Force [5].

La trave di Benkelmann

La prova di Benkelmann, diffusa negli Stati Uniti nel 1953, utilizza un'apparecchiatura che consente di determinare la deflessione del sottofondo, o dell'intera pavimentazione, provocata da un carico statico, rappresentato dalle due ruote gemelle dell'asse di un autocarro, di cui sono note sia l'entità in termini di forza applicata alla coppia di ruote (50 kN), sia la pressione di gonfiaggio (0.70 MPa) [6]. La determinazione del modulo elastico statico avviene mediante l'utilizzo della formulazione di Boussinesq [7]. In Italia, l'esecuzione della prova Benkelmann in laboratorio è definita dalla Norma contenuta nel Bollettino Ufficiale del CNR n. 141 del 15/10/1992. [8].

La prova di carico su piastra (PLT)

La prova di carico con piastra statica, dall'inglese plate loading test (PLT) [9], prevede il caricamento ad incrementi successivi e regolari di una piastra rigida, generalmente circolare, appoggiata sulla superficie di prova, misurando il cedimento corrispondente ad ogni step di carico, con possibilità di effettuare cicli di carico e scarico. La modalità della prova è descritta nella norma CNR BU 146/1992 [10] le cui prescrizioni impongono incrementi di carico prefissati diversi per ogni strato della pavimentazione.

Tecniche di indagine non distruttiva

Il Falling Weight Deflectometer (FWD)

Il Falling Weight Deflectometer (FWD) è costituito essenzialmente da una massa nota in grado di generare sul sottofondo un carico di tipo impulsivo cadendo su un gruppo di molle montate su una piastra appoggiata sulla pavimentazione, rendendo quindi dinamica la sollecitazione indotta. Il sistema prevede sette trasduttori accelerometrici (geofoni) disposti in linea in grado di misurare il bacino delle deflessioni, di tipo elastiche e viscosi reversibili. Attraverso un procedimento di back analysis, è possibile ricavare i moduli dinamici dei vari strati, compreso il sottofondo, assegnando diversi valori di tentativo dei moduli degli strati e verificando quali di questi valori producono le deflessioni che meglio approssimano quelle misurate [11].

Il FWD può essere utilizzato per analisi su tutti i tipi di sedi stradali, sulle piste aeroportuali, sia su pavimentazioni in bitume (normale o additivato) sia su elementi in calcestruzzo; l'unico limite al suo impiego è rappresentato dalle dimensioni dello strumento, che non ne rendono sempre possibile l'accesso al sito.

Il Light Falling Weight Deflectometer (LFWD)

Il principio di funzionamento del Light Falling Weight Deflectometer (LFWD) [12] è il medesimo del FWD ed è riconducibile ad una massa nota che impatta più volte una piastra di carico posizionata sul piano in esame, permettendo di registrare pressioni e cedimenti ad ogni colpo tramite un sistema di geofoni (**Figura 1**). In virtù delle dimensioni degli elementi di carico e dei dispositivi di

acquisizione dati, il LFWD risulta agevolmente trasportabile da un singolo operatore e pertanto è spesso anche chiamato Portable Falling Weight Deflectometer o, appunto, deflettometro portatile a massa battente. Fu sviluppato in Germania proprio per ovviare ai problemi di accessibilità e di operabilità derivanti dalla più complessa procedura di test prevista per l'utilizzo dell'FWD [13, 14].



Figura 1: Misura delle caratteristiche meccaniche tramite Light Falling Weight Deflectometer.

Il Ground-Penetrating Radar (GPR)

Il georadar o Ground-Penetrating Radar (GPR) è uno strumento mutuato dalle applicazioni di natura geofisica basato sulla propagazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo di indagine che ha riscontrato un notevole successo in diverse discipline, tra cui quelle archeologiche e geologiche, dell'ingegneria strutturale e idraulica, delle scienze planetarie, benché l'applicazione originaria e di maggiore impiego, per cui vengono finanziate in tutto il mondo circa il 90% delle attività con questo strumento, è quella della ricerca delle mine antiuomo [15]. Per le caratteristiche geometrico-costruttive delle pavimentazioni stradali, questa tecnologia ha trovato considerevole successo nel campo dell'ingegneria stradale. Nella configurazione standard, è possibile misurare il ritardo temporale tra l'istante in cui si trasmette il segnale elettromagnetico tramite antenna trasmittente e quello necessario alle onde riflesse dal bersaglio per tornare all'antenna ricevente. Con una successiva fase di analisi del segnale registrato, è possibile monitorare la variazione dei parametri elettromagnetici costitutivi del sottosuolo. La limitazione della profondità di indagine si lega principalmente a fenomeni di attenuazione dell'onda elettromagnetica trasmessa, la cui energia diminuisce progressivamente all'aumentare della profondità e può dipendere da effetti di varia natura, riconducibili alla presenza di acqua, alle frequenze centrali di acquisizione, e alla distanza dal sistema di antenne. Generalmente, un sistema GPR si caratterizza per le sue capacità di penetrazione e risoluzione del segnale.

Le caratteristiche di frequenza della radiazione influenzano in modo assai rilevante la penetrazione del sistema, in quanto al diminuire di essa diminuiscono le dissipazioni e si determina un aumento delle profondità di penetrazione raggiungibili. Per quanto concerne le caratteristiche di risoluzione del sistema, si distinguono la risoluzione verticale, ossia la capacità di poter identificare due riflettori vicini a diversa profondità, ed una risoluzione orizzontale, che si riferisce alla capacità di poter riconoscere due oggetti vicini alla stessa profondità. La risoluzione verticale è direttamente proporzionale alla frequenza centrale di acquisizione, aumentando all'aumentare di questa, mentre la risoluzione orizzontale dipende dalla frequenza degli impulsi emessi dall'antenna e dalla velocità con cui il georadar si muove, ed è legata alle caratteristiche costruttive dell'encoder di acquisizione. Nelle applicazioni stradali si utilizza solitamente una risoluzione orizzontale variabile tra 1 cm ÷ 10 cm, a seconda delle applicazioni e dell'estensione delle indagini.

Nel campo delle applicazioni stradali per la stima delle caratteristiche di resistenza e deformazione degli strati della pavimentazione, il georadar ricopre convenzionalmente un ruolo complementare a quello della strumentazione FWD, in quanto utilizzato nella maggior parte dei casi per la stima delle caratteristiche geometriche degli strati, necessarie per l'implementazione di procedure di back analysis.

In questo studio, la capacità dello strumento di fornire indicazioni autoconsistenti affidabili sulle caratteristiche meccaniche della pavimentazione viene valutata indipendentemente dall'impiego di tecnologia a supporto.

Un modello semi-empirico per la valutazione del modulo di elasticità tramite Georadar

Basi teoriche di riferimento

L'approccio semi-empirico, alla base del modello presentato in questo articolo, si basa su un'impostazione teorica del problema, che prevede una calibrazione dei parametri utilizzando dati meccanici raccolti sperimentalmente in sito.

L'idea di una relazione tra le caratteristiche meccaniche e quelle dielettriche di terreni naturali e materiali sciolti addensati fu introdotta nei primi anni '90 da Mitchell [16], il quale ipotizzò una dipendenza tra le caratteristiche meccaniche di un materiale granulare, che sono funzione dell'entità delle interazioni tra i grani che lo compongono, e le caratteristiche dielettriche, che dipendono dalla composizione e dalla densità del materiale. A queste ultime possono sicuramente essere riconducibili le caratteristiche di densità apparente del materiale, da cui dipendono a loro volta grandezze quali l'indice dei vuoti e l'acqua libera all'interno del materiale, in grado di influenzare fortemente la risposta elettromagnetica del materiale stesso [17].

In questo senso dunque, è ragionevole attendersi un buon grado di correlazione tra la resistenza meccanica, esprimibile ad esempio attraverso il modulo di Young (o modulo elastico E), e le proprietà dielettriche di un determinato materiale, come l'ampiezza A di riflessione di un segnale georadar. A partire da queste considerazioni, quindi, è stato proposto un modello per la valutazione del modulo elastico E [MPa] secondo la seguente relazione:

$$E_{x,y} = \frac{\gamma \int_0^{z,max} A_{x,y,z[0,1]} \mu_z dz}{\alpha \left(\gamma \int_0^{z,max} A_{x,y,z[0,1]} \mu_z dz \right) + \beta} \quad (1)$$

In cui $A_{x,y,z[0,1]}$ rappresenta l'ampiezza normalizzata della riflessione del segnale elettromagnetico misurata tramite georadar, nel punto di coordinate $[x,y]$ e alla profondità z . Il parametro μ_z , invece, dipende dalla profondità z e ricopre la duplice funzione di amplificare gli effetti delle riflessioni più profonde, che vengono ricevute dall'antenna in maniera più attenuata, e di considerare il diverso contributo in termini di modulo elastico dei materiali stradali dei vari strati della pavimentazione situati a differenti profondità. Infine, γ è una costante di scala, mentre α e β sono due coefficienti di amplificazione, di valore costante, che consentono al modello una maggiore flessibilità anche nei punti di maggiore variabilità del dato meccanico.

La calibrazione dei coefficienti α , β , γ e della funzione μ_z ha necessitato di dati *ground-truth* che esprimessero valori affidabili di resistenza meccanica della pavimentazione stradale, in termini di modulo elastico E . A tal fine, le prove di caratterizzazione della resistenza meccanica della pavimentazione di prova sono state effettuate con strumentazione LFWD.

Da un punto di vista strettamente teorico, l'applicazione del deflettometro permette di valutare la resistenza meccanica del mezzo indagato, espressa come E [MPa] tramite la teoria di Boussinesq:

$$E = \frac{k(1-\nu^2)\sigma R}{\delta_c} \quad (2)$$

dove k è una costante che assume il valore di 2 o di $\pi/2$ a seconda che si stia indagando una pavimentazione flessibile o rigida, rispettivamente; ν rappresenta il coefficiente di Poisson, σ è la pressione imposta dal carico sulla piastra [MPa], R è il raggio della piastra stessa [mm] e δ_c rappresenta la deflessione registrata al centro della piastra [μ m].

Fase sperimentale e calibrazione del modello alla meso-scala

La calibrazione del modello ha previsto l'esecuzione di una campagna prove su sito sperimentale appositamente realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi Roma Tre. Il sito (**Figura 2**) si sviluppa su un'area di dimensioni 4m × 30 m composta da una pavimentazione di tipo flessibile. Operazioni di carotaggio hanno rivelato una struttura a strati così composta: circa 80 mm di usura e binder, 100 mm di base in misto bitumato, e 100 mm di fondazione in misto granulare sciolto. Per caratterizzare l'area di indagine in maniera più efficiente ed efficace, è stata realizzata una griglia a maglie quadrate di lato 0.40 m ognuna, per complessivi 76 × 11 nodi, in maniera tale da configurare 836 nodi.

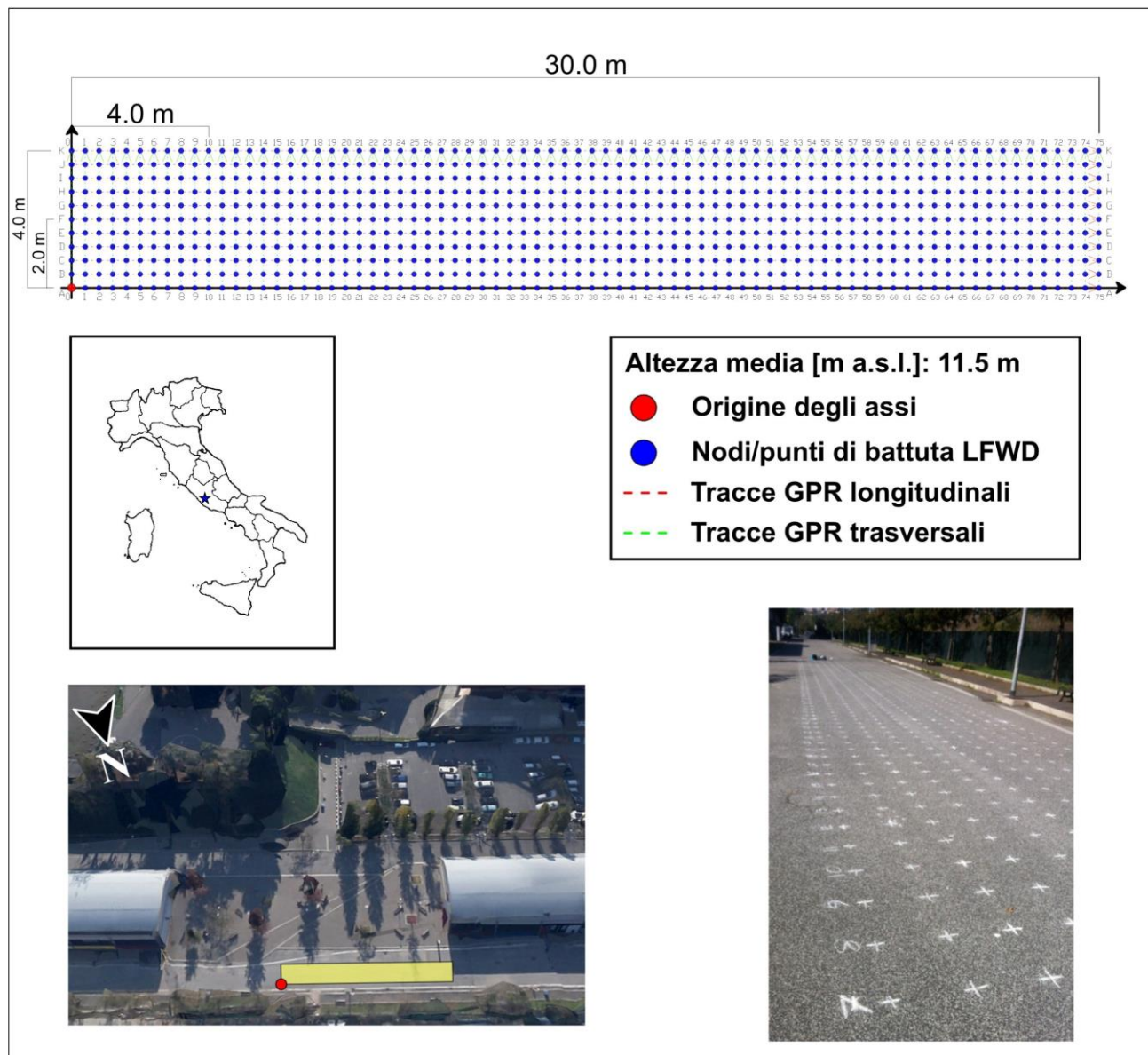


Fig. 2 – Il sito sperimentale realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi Roma Tre.

Righe e colonne di tale griglia disegnano quindi un intreccio regolare di tracce longitudinali e trasversali lungo le quali sono state effettuate delle scansioni georadar con il sistema multi-frequenza RIS 99-MF, prodotto da IDS Ingegneria dei Sistemi SpA, dotato di due antenne a contatto con frequenze centrali di investigazione pari a 600 MHz e 1600 MHz, e operante su 4 canali, di cui 2 monostatici e 2 bistatici (**Figura 3**). Il segnale è stato acquisito nel dominio del tempo, con una

finestra temporale di 40.076 ns ed una risoluzione temporale di acquisizione dt pari a 7.8273×10^{-2} m.



Fig. 3 – Il georadar ad antenne accoppiate a terra RIS 99-MF, prodotto da IDS Ingegneria dei Sistemi SpA.

Attraverso una successiva fase di post-processing del segnale, è stato possibile associare un segnale radar di riferimento ad ogni punto della griglia, risultato della media dei segnali ricevuti in un intorno di ± 0.20 m da ciascun nodo. Assegnando dunque alla velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica un valore costante di propagazione nel mezzo pari a 10 cm/ns, è stato possibile passare dal dominio del tempo a quello delle profondità z , e quindi realizzare una matrice tridimensionale di ampiezze $A_{x,y,z}$.

L'utilizzo del LFWD ha permesso inoltre di associare un valore di modulo elastico misurato ad ognuno degli 836 nodi mediante deflettometro Prima 100, prodotto e commercializzato dalla compagnia danese Carl Bro Pavement Consultants Kolding. La configurazione di prova ha previsto l'utilizzo di un maglio battente di 10 Kg e una piastra metallica di raggio 100 mm. La procedura di misura LFWD si è svolta eseguendo 6 battute per ogni punto indagato, in modo da ottenere un valore di modulo di elasticità statisticamente consistente.

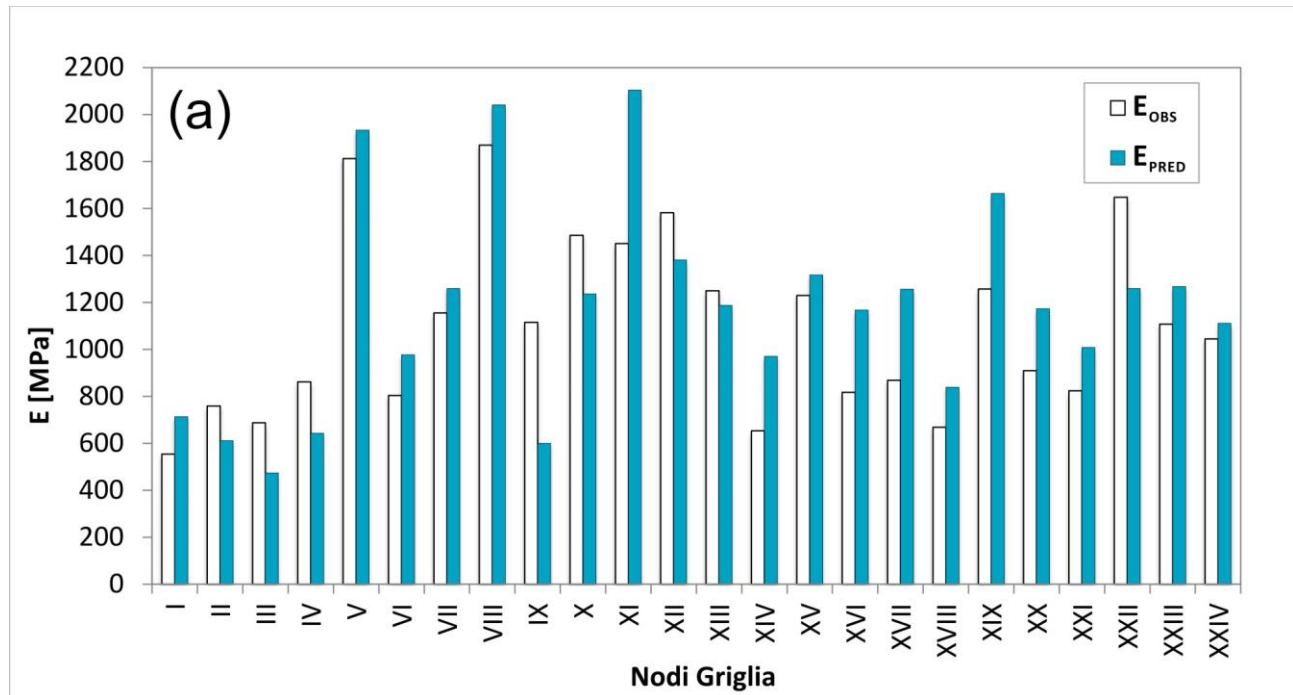
Con l'intento di minimizzare gli sforzi computazionali e di descrivere efficacemente la relazione tra i risultati ottenuti tramite georadar e LFWD, sono stati selezionati quattro piani $[x, y]$ significativi della matrice 3-D realizzata tramite i dati radar, compresi tra le profondità $[0, 20]$ cm. Da un punto di vista concettuale, le profondità di tali piani corrispondono alle interfacce tra gli strati della pavimentazione. Il limite superiore dei 20 cm è invece coerente con i limiti di indagine del bacino di deflessione dello strumento su materiali stradali analoghi a quelli investigati nel presente studio [14].

Il valore dei parametri α , β , γ , μ_1 , μ_2 , μ_3 e μ_4 in equazione (1) sono quindi stati calibrati selezionando casualmente 24 degli 836 nodi della griglia e minimizzando l'errore quadratico medio tra il valore di E da modello (E_{PRED}) e quello misurato tramite LFWD (E_{OSS}). Sulla base di questo approccio, l'equazione (1), assume quindi la seguente forma:

$$E_{PRED} = \frac{111.397(4.7A_{x,y,z1}+3.0A_{x,y,z2}+1.4A_{x,y,z3}+8.0A_{x,y,z4})}{-9.48 \cdot 10^{-4}(111.397(4.7A_{x,y,z1}+3.0A_{x,y,z2}+1.4A_{x,y,z3}+8.0A_{x,y,z4})+1.89)} \quad (3)$$

Validazione del modello e sintesi dei principali risultati

Il modello è stato infine validato selezionando nuovamente in maniera casuale altri ulteriori 24 punti della griglia, verificandone la capacità di riprodurre i valori osservati direttamente sul campo. Tale processo ha prodotto risultati molto promettenti. E' stato infatti calcolato un valore del coefficiente di determinazione R^2 di 0.87 (Figura 4).



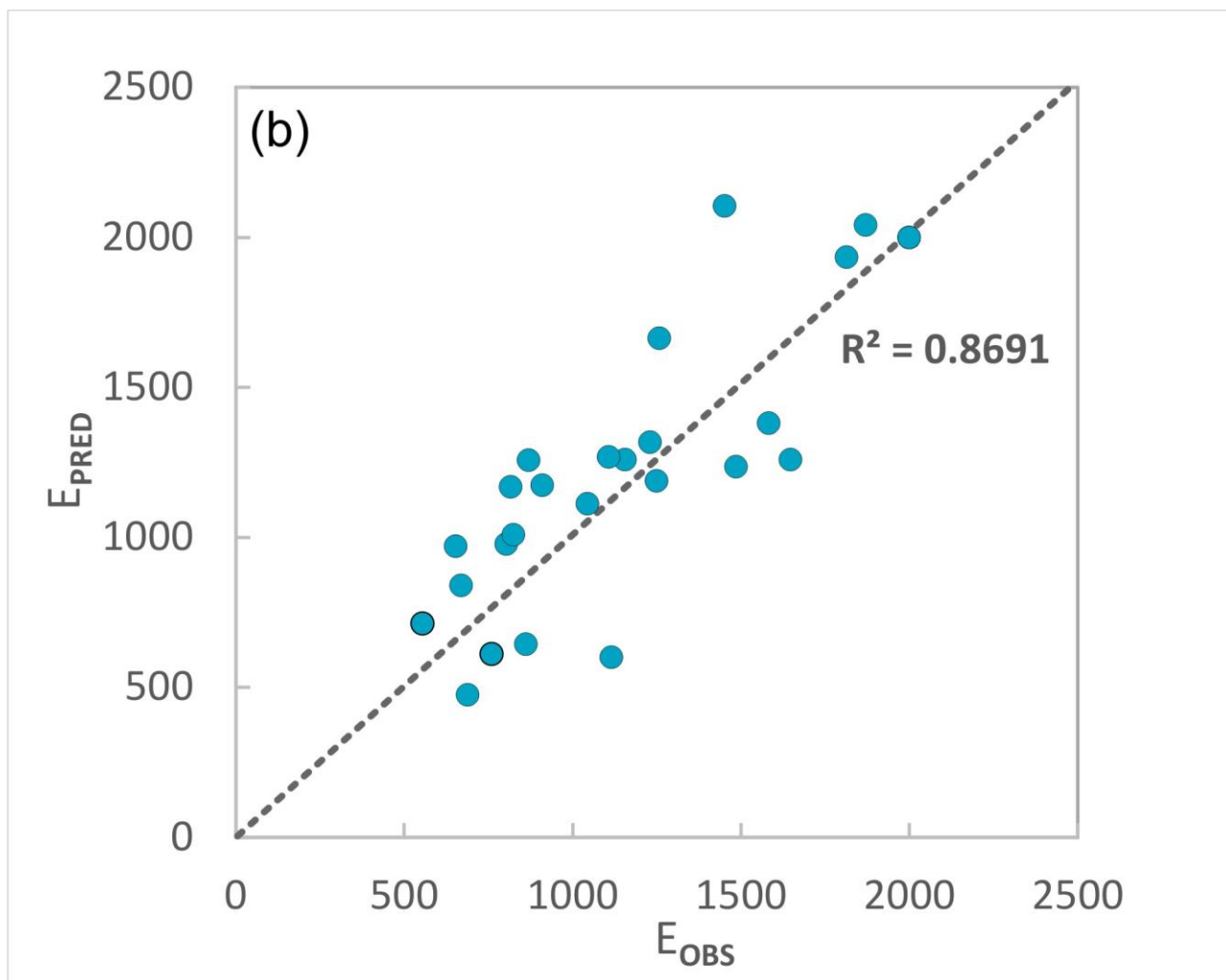


Figura 4: Risultati della validazione del modello di calcolo; (a) confronto tra i valori assoluti dei moduli elastici osservati e predetti; (b) coefficiente di determinazione tra modulo elastico osservato e predetto.

Interpolando i risultati ottenuti dal modello e quelli misurati sul campo è stato possibile generare delle mappe spaziali di E_{PRED} ed E_{OBS} al fine di consentire un confronto visivo tra la distribuzione dei dati misurati e di quelli predetti. Dal confronto tra queste due mappe (Figura 5), è ben visibile una buona stima da parte del modello, in particolar modo nell'area compresa tra le seguenti coordinate: $27.6 \text{ m} < x < 29.6 \text{ m}$ e $1.2 \text{ m} < y < 2.0 \text{ m}$, per valori di $E > 2600 \text{ MPa}$. Quest'area corrisponde ad una zona interessata da precedenti interventi di ripavimentazione, chiaramente visibili a seguito un'ispezione visiva del sito. Analogamente, un'altra buona corrispondenza è osservabile lungo la linea centrale dell'area investigata, in senso longitudinale, delimitata dalla zona compresa tra $2.4 \text{ m} < x < 22.4 \text{ m}$. In questa fascia, i valori medio-alti di modulo elastico ($1300 \div 1900 \text{ MPa}$) possono essere ragionevolmente collegati alle operazioni di costipamento, più efficaci lungo la direttrice longitudinale e nella zona centrale della sezione trasversale della strada.

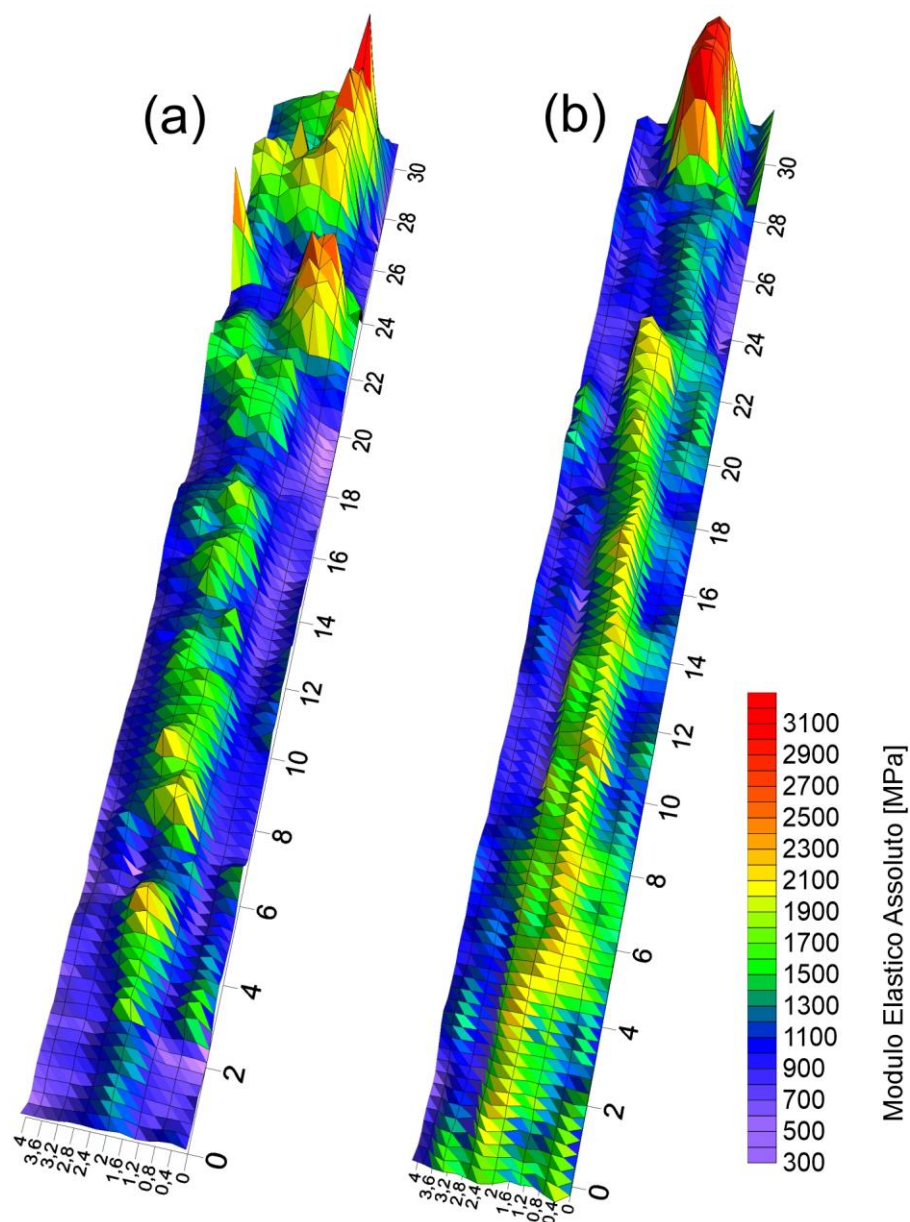


Figura 5: Mappe di modulo elastico osservato (a) e predetto (b).

Conclusioni

In questo articolo viene presentato un modello semi-empirico di previsione delle proprietà meccaniche della sovrastruttura di una pavimentazione flessibile per mezzo di indagini non distruttive condotte tramite strumentazione georadar. A questo scopo, un campo prova di dimensioni $4\text{ m} \times 30\text{ m}$ è stato investigato conducendo prove radar e deflettometriche su una griglia a maglia quadrata di 836 nodi, distanziati 0.40 m ciascuno l'uno dall'altro.

La calibrazione del modello è stata condotta mettendo in relazione le misure deflettometriche ottenute tramite impiego di LFWD e le misure delle ampiezze dei segnali radar su 24 punti

selezionati in maniera casuale all'interno della griglia, e minimizzando gli errori tra il valore di modulo elastico osservato con LFWD e quello predetto da modello.

La validazione del modello è avvenuta selezionando casualmente ulteriori 24 nodi, restituendo un valore del coefficiente di determinazione R^2 pari a 0.87, ed una generale buona attendibilità del modello proposto nel predire la resistenza meccanica della pavimentazione, anche in presenza di oscillazioni locali dei valori di modulo elastico.

Nonostante alcune discrepanze di interpretazione dei valori di modulo elastico da modello, che necessita tuttavia di ulteriori approfondimenti, l'approccio utilizzato mostra ottime prospettive nel raggiungimento di un'efficace e affidabile valutazione delle proprietà meccaniche delle pavimentazioni flessibili attraverso ispezioni georadar. Studi futuri possono essere indirizzati alla calibrazione di un modello che consideri le diverse velocità di propagazione del segnale nei vari strati del pacchetto di pavimentazione, capace di interpretare in maniera più complessa la configurazione tipicamente multistrato di una pavimentazione.

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare la COST Action TU1208 "Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar", nell'ambito della quale sono state sviluppate parte delle attività di ricerca discusse nel presente studio; IDS SpA per la collaborazione e assistenza tecnica; il Sig. Spartaco Cera, Tecnico del Laboratorio dell'Università di Roma Tre, per l'attività svolta sul sito sperimentale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Tighe, N. Li, L.C. Falls and R. Haas, "Incorporating road safety into pavement management", Transportation Research Record, vol. 1699, pp. 1-10, 2000.
- [2] ASTM D1883-14, Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- [3] UNI EN 13286-47:2012, Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling. European standard.
- [4] ASTM D4429-09a, Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, www.astm.org
- [5] U.S. Department of the Air Force - Headquarters Air Force Civil Engineer Support Agency, 2008. Structural evaluation procedure for stabilized soil-surfaced airfields. Engineering Technical Letter (Etl) 08-14.
- [6] ASTM D4695-03(2008), Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, www.astm.org
- [7] Horn R. Strength of structured soils due to loading- a review of the processes on macro- and microscale-European aspects. In: Larson WE, Blake GR, Allmaras RR, Voorhees WB, Gupta S, editors. Mechanics and related processes in structured agricultural soils. Kluwer Publ; Applied Sciences; 1989. p. 9–22.
- [8] Consiglio Nazionale delle Ricerche, Bollettino Ufficiale del CNR Parte IV - Norma Tecnica 15/10/1992 n.141, Determinazione della deflessione di una sovrastruttura flessibile o di un sottofondo stradale mediante il deflettometro Benkelmann.
- [9] ASTM D1195 / D1195M-09, Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, www.astm.org
- [10] Consiglio Nazionale delle Ricerche, Norma Tecnica CNR BU 146/1992, Determinazione dei moduli di deformazione Md e Md1 mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare. 24 p.
- [11] ASTM D4694-09, Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, www.astm.org
- [12] ASTM E2583-07(2011), Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org
- [13] Benedetto, A., Tosti, F., and Di Domenico, L. (2011). Il dominio di significatività con il Light Falling Weight Deflectometer, Strade e Autostrade, 89 (5), 152–157. ISSN: 1723-2155.
- [14] Benedetto, A., Tosti, F., Di Domenico, L. (2011). Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer, Journal of Terramechanics, 49, 1–12.

- [15] A. Benedetto, F. D'Amico "Applicazioni del Georadar al Monitoraggio delle Strade: i Risultati Consolidati e le Prospettive", *Strade & Autostrade*, vol. 59(5) pag.76-87, 2006.
- [16] J. K. Mitchell, "Fundamentals of Soil Behaviour", Second Edition. New York, NY: John Wiley & Sons, 1993.
- [17] D.J. Daniels - "Surface-penetrating radar", The Institution of Electrical Engineers, London, U.K., 1996.